

Розробка алгоритму адаптації відеозображення до спектрального розподілу джерел освітлення

В. В. Пилявський

Зроблено пропозиції щодо подальшого прогресу відеотехнологій, питання, які потрібно вирішити задля реалізації цього прогресу та можливі шляхи впровадження в реальні пристрої спеціального та загального застосування. Пропонується доповнити загальноприйняту модель відеотракту моделлю кольоросприйняття та моделлю адаптивною до спектрального розподілу джерела освітлення. Приділяється увага кінцевим пристроям відеотракту, які можуть вносити недопустимі зміни до передаваної відеоінформації, а саме кольору. Представлені схеми моделювання алгоритму адаптації до спектрального розподілу джерела освітлення. Розглянуто можливість універсального використання пропонованого алгоритму в системах передавання відео. Запропоновано алгоритм адаптації відеозображення до спектрального розподілу джерел освітлення, що базується на виборі еталонних спектральних розподілів по заданих координатах кольору. Представлено алгоритм виділення спектрального розподілу джерела освітлення із загальної сцени зображення. Пропонується метрологічне забезпечення для розрахунку величини впливу джерела освітлення на якість кольоропередавання. Пропонується в якості оптичних випробувальних зображень для тестування якості кольоропередавання використовувати спектральні розподіли кольорів, набір яких представлено в роботі. Представлено порівняльні характеристики з існуючими спектральними розподілами та показано, що не достатньо для реалізації пропонованого в роботі алгоритму. Результати моделювання доводять необхідність та переваги від використання пропонованого алгоритму. Зображення після застосування алгоритму є таким, якби його спостерігали при сонячному освітленні не залежно від того при якому типі освітлення здійснювалась зйомка чи спостереження. Крім того, представлений алгоритм дозволяє адаптуватись до спектрального розподілу різних джерел освітлення, таких як лампи розжарювання, флуоресцентні, світлодіодні, сигнальні ракети тощо

Ключові слова: спектр, адаптація, кольоропередавання, кольоросприйняття, оцінювання, метрологія, відеозастосування, відеозв'язок, CAM16

1. Вступ

Прогрес відеотехнологій спостерігається на розвитку області стандартизації, з появою систем цифрового телебачення – системи телебачення стандартної та високої чіткості [1], а згодом з'являється рекомендація [2]. Це свідчить про недостатність та необхідність в удосконаленні існуючих та створенні принципово нових рішень в системах передавання відео.

Подальший прогрес відео технологій просліджується на введенні системи з розширеним динамічним діапазоном (HDR – high dynamic range) [3]. Часткове введення адаптивних систем кольоропередавання [4] в системи цифрового телебачення є кроками подальшого прогресу.

Сучасні системи передавання відео побудовані на загальноприйнятій системі скрізного тракту. Якщо прийняти, що загальноприйнята система не вносить спотворень чи вони ідентифікуються як «прийнятні», то існують ділянки тракту, де порушується вірність кольоропередавання та кольоросприйняття глядачем. На передавальній стороні – це проміжок від об'єкту до об'єктиву передавального пристрою, та на приймальній стороні – від пристрою відтворення до спостерігача. На даний час досить мало зазначається про спотворення, що мають місце в зазначених ділянках тракту й шляхів виключення. Передусім дослідження відокремлені, бо проводяться окремо для джерел освітлення й того, як людина приймає це. Але не проводяться дослідження того, як саме відображається цей комплексний вплив під час передавання каналами відеозв'язку. Дані дослідження є актуальними перш за все в місцях, де передавання кольору каналами відеозв'язку є вкрай важливим, а саме, у спеціальних та військових застосуваннях, в е-медицині, текстильній промисловості тощо.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Джерела освітлення поділяють на природні та штучні, причому штучні джерела освітлення слід ділити на професійні, напівпрофесійні та побутові [5]. Перелічені джерела освітлення, як зазначалось раніше, потребують врахування чи адаптації при побудові нових системи відеозв'язку чи вдосконаленні існуючих. Це пов'язане з тим, що вони можуть впливати на передавальній і на приймальній стороні відеотракту.

В роботі [6] представлено дослідження, що враховують властивості кольоросприйняття при різному освітленні у трактах передавання відеоінформації та вплив на якість кольору джерела освітлення. Отже питання слід розглядати з двох сторін – з однієї – це те, як саме змінюються кольори при освітленні різними джерелами, та з іншої – як це сприймає глядач.

Показано, що джерела освітлення призводять до недопустимих змін кольору, а поруч з тим, при врахуванні властивостей кольорового зору ці зміни будуть ще більшими. Вирішення питань щодо зменшення змін кольору не було вирішено для каналів відеозв'язку. Подальше дослідження відображається в роботі [7], де автор пропонує алгоритм хроматичної адаптації, що може базуватись на кольорових координатах. Дослідження роботи [8] відображають криву кольорової температури джерел освітлення з точки зору кольоросприйняття. У роботах [7, 8] проведено аналіз на основі кольорових координат, але не враховано, як саме джерело освітлення, його спектральний розподіл впливає на інші кольори.

Причини, з якої дані питання не вирішувались, можуть бути наступними: відсутність апаратних потужностей для обробки в реальному масштабі часу,

відсутність жорстких вимог до передавання кольору, наприклад в е-медицині, відсутність цифрових систем відеозв'язку тощо.

Одним з можливих шляхів розв'язання даних питань є використання моделі кольоросприйняття при вдосконаленні існуючих та проектуванні нових систем відеозв'язку. Так, спробу впровадити систему прогнозування сприйняття кольору було зроблено в роботі [9]. Поруч з тим, роботу слід доповнити використанням алгоритму, що зменшує вплив джерела освітлення на якість кольору. Автори зазначають не вирішені питання щодо некоректності роботи моделі кольоросприйняття.

Висвітлення можливого рішення було представлено в роботі [10], де автори пропонують аналітичне рішення питання появи від'ємної реакції моделі кольоросприйняття. В роботі [11] доводиться правдивість даних, що представлені в [10], але залишаються не вирішеними запитання щодо рівномірності заповнення кольорів в кольоровій діаграмі.

Саме це питання вирішується в роботах [12, 13], де нерівномірність розміщення кольорів в синій, жовто-блакитній та червоній виключається шляхом застосування нового аналітичного опису проведених раніш експериментів. Удосконалена модель може бути використана для подальших досліджень з врахуванням зазначених напрацювань [14], які є необхідними при врахуванні універсального обміну кольоровою інформацією між різними системами. Це досить поширено серед обміну графічною та відеоінформацією каналами зв'язку.

Проведений аналіз [5–14] показує, якщо питання розвитку моделей кольоросприйняття здійснюється хоч і не для систем відеозв'язку, то питання впливу спектрального розподілу джерел освітлення на якість кольорів недостатньо досліджено. Це дозволяє стверджувати доцільність досліджень, пов'язаних з впровадженням в системах відеозв'язку алгоритму щодо врахування властивостей кольоросприйняття відеоінформації та спектрального розподілу джерела освітлення.

3. Ціль та задачі дослідження

Ціллю роботи є розробка алгоритму адаптації відеосистеми до спектрального розподілу джерела освітлення з врахуванням властивостей кольоросприйняття спостерігача. Це дозволить зменшити вплив джерел освітлення на якість передавання кольору, що вкрай важливе наприклад в медицині, військовій техніці тощо.

Для досягнення поставленої цілі необхідно вирішити задачі:

- визначити спектральний розподіл кольору передаваного зображення за відомими координатами кольоровості;
- врахувати властивості кольоросприйняття при розробці алгоритму;
- дослідити можливість використання пропонованого алгоритму в умовах технічних обмежень відеосистеми;
- забезпечити метрологічним інструментом систему задля оцінювання якості функціонування алгоритму.

4. Матеріали та методи дослідження щодо впровадження адаптивної системи відеозв'язку

Вирішення поставлених задач може здійснюватися з використанням методів та засобів дослідження, що дозволять врахувати в повній мірі доповнення до тракту системи відеозв'язку зображених на рис. 1. На рис. 1 зображено спрощену структурну схему скрізного відеотракту з зазначенням точок, що можуть впливати на якість передавання відео.

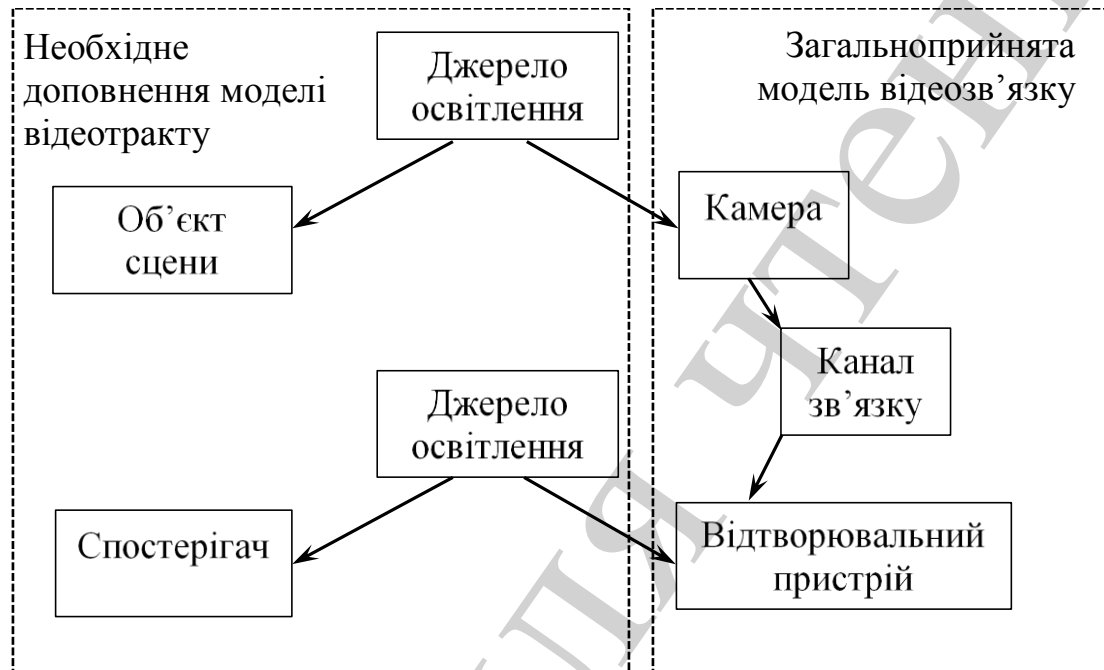


Рис. 1. Вплив джерела освітлення на передавальній та приймальній сторонах відео тракту

Об'єкт сцени буде описаний з точки зору спостерігача чи відеооператору моделлю кольоросприйняття, власне як і спостерігач на приймальній стороні тракту. Джерело освітлення є чинником, що впливає на модель кольоропередавання, як на передавальній стороні, так і на приймальній. Припущено, що загальноприйнята модель не вносить спотворень чи вони є не помітними. Тому подальші дослідження будуть стосуватись методів та засобів зменшення впливу на якість кольоропередавання.

4. 1. Алгоритм адаптації до спектрального розподілу джерела освітлення

Головною ціллю адаптації є неперервне чи періодичне визначення впливу джерела освітлення на якість передаваного кольору та корекція відеосигналу в залежності від величини зміни координат кольоровості.

Адаптація до спектрального розподілу джерела освітлення складається з двох підзадач, а саме, отримання значення спектрального розподілу об'єкту сцени та спектрального розподілу джерела освітлення.

Дані спектрального розподілу джерела освітлення можуть вимірюватись додатковим пристроєм чи зберігатись у вигляді масиву числових значень у пристрої, що є складовою системи адаптації.

Отримання даних щодо спектрального розподілу об'єкту сцени є задачею складною. Це пов'язане з тим, що складні об'єкти сцени з великою детальністю містять в собі інформацію про множину кольорів і відповідну множину спектральних розподілів. Саме тому визначити кожний з них не представляється можливим, із-за складності апаратної реалізації, а відповідно і процес визначення впливу джерела освітлення окремо на кожний колір. Тому для визначення впливу джерела освітлення на множину кольорів пропонується алгоритм, представлений на блок-схемі (рис. 2).

Блок схема складається з двох частин: перша – це загальноприйнята частина відео тракту, друга – алгоритм визначення адаптуючих коефіцієнтів та врахування в сигналах відеозв'язку загальноприйнятої моделі.

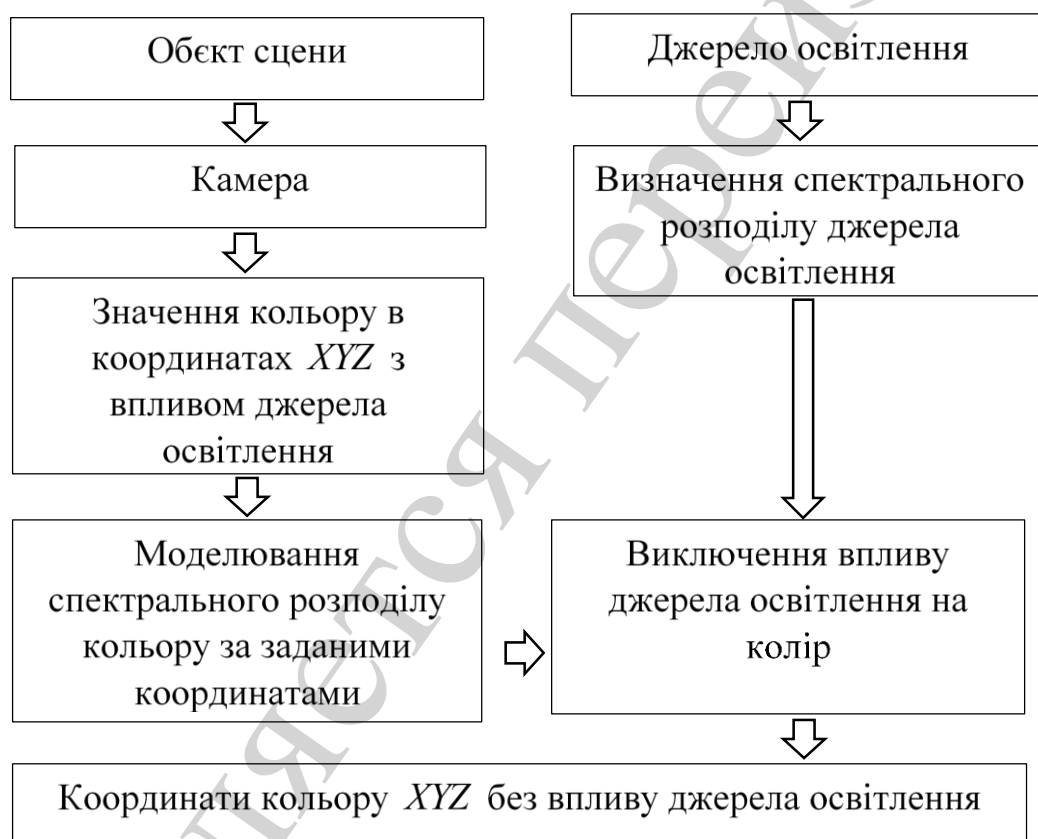


Рис. 2. Алгоритм адаптації кольору об'єкту сцени до спектрального розподілу джерела освітлення

Перша частина блок схеми описує визначення параметрів кольору XYZ (1) та x_{yz} (2), що отримано на виході перетворювача «світло-сигнал» й передачу скрізним каналом зв'язку.

$$X = \int_{400}^{700} \bar{x}(\lambda) \cdot P(\lambda) \cdot S(\lambda), \quad Y = \int_{400}^{700} \bar{y}(\lambda) \cdot P(\lambda) \cdot S(\lambda),$$

$$Z = \int_{400}^{700} \bar{z}(\lambda) \cdot P(\lambda) \cdot S(\lambda), \quad (1)$$

$$x = X/m, \quad y = Y/m, \quad z = Z/m, \quad m = \sum(X, Y, Z), \quad (2)$$

де $S(\square)$ – спектральний розподіл кольору, що отриманий шляхом моделювання. $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ – спектральна чутливість каналів кольоровості перетворювача «світло-сигнал», $P(\square)$ – спектральний розподіл джерела освітлення.

Паралельно визначенню параметрів кольору об'єкту сцени визначається спектральний розподіл джерела освітлення. Для виключення параметрів впливу джерела освітлення на кожний з можливих кольорів об'єкту сцени необхідно знати характер і величину впливу джерела освітлення. Тому для визначення зазначених величин слід провести оцінювання на визначеному наборі кольорів, що рівномірно розміщуються в області передаваних кольорів системи. Для цієї реалізації необхідно використати набір кольорів, останні різняться між собою. Набір випробувальних кольорів може мати різну величину вибірки, так, наприклад, авторами [15] розглядалась вибірка з 4, 9, 14, 15, 17, 99 кольорів (chapter 2). Зазначені набори кольорів не заповнюють рівномірно й повністю область передаваних кольорів, тому доцільність використання є неоднозначною.

В системах відеозв'язку область передаваних кольорів обмежується при певних умовах, характеристиках обладнання тощо, [16], але якщо прийняти, що все відповідає нормам, то область передаваних й сприйманих кольорів обмежується трикутником кольорів. Для оцінювання якості кольоропередавання області обмеженої трикутником кольорів до набору слід додати вимірювальні кольори, що знаходяться в трикутнику [17] й мають відносну насиченість рівну 0.9, відповідно червоний $R_{0.9}$, зелений $G_{0.9}$ та синій $B_{0.9}$ та 0.5. Для збільшення точності основний набір кольорів доповнюють додатковими до основних кольорів, – жовтим Ye , голубим C та пурпурним M зазначених вище насиченості та для оцінки насичених кольорів – з насиченістю 1. Кожен колір характеризується координатами кольорового простору x_{yz} , що представлено в табл. 1. Координати представлені на основі трикутника кольорів телебачення високої чіткості.

Таблиця 1

Координати набору випробувальних кольорів в системі координат x_{yz}

	R	G	B	C	M	Ye	$R_{0.9}$	$G_{0.9}$	$B_{0.9}$	$C_{0.9}$	$M_{0.9}$	$Ye_{0.9}$	$R_{0.5}$	$G_{0.5}$	$B_{0.5}$
x	0.640	0.300	0.150	0.224	0.321	0.419	0.595	0.300	0.224	0.231	0.320	0.408	0.440	0.305	0.224
y	0.330	0.600	0.060	0.328	0.154	0.505	0.329	0.578	0.182	0.329	0.171	0.487	0.329	0.476	0.182

Для формування масиву корегуючих значень координат кольоровості слід змодельовати алгоритм визначення спектрального розподілу кольору за заданими координатами кольоровості.

4. 2. Визначення параметрів випробувальних кольорів

Знаходження спектрального розподілу кольору за заданими координатами кольоровості пропонується здійснювати за алгоритмом, представленим на рис. 3.

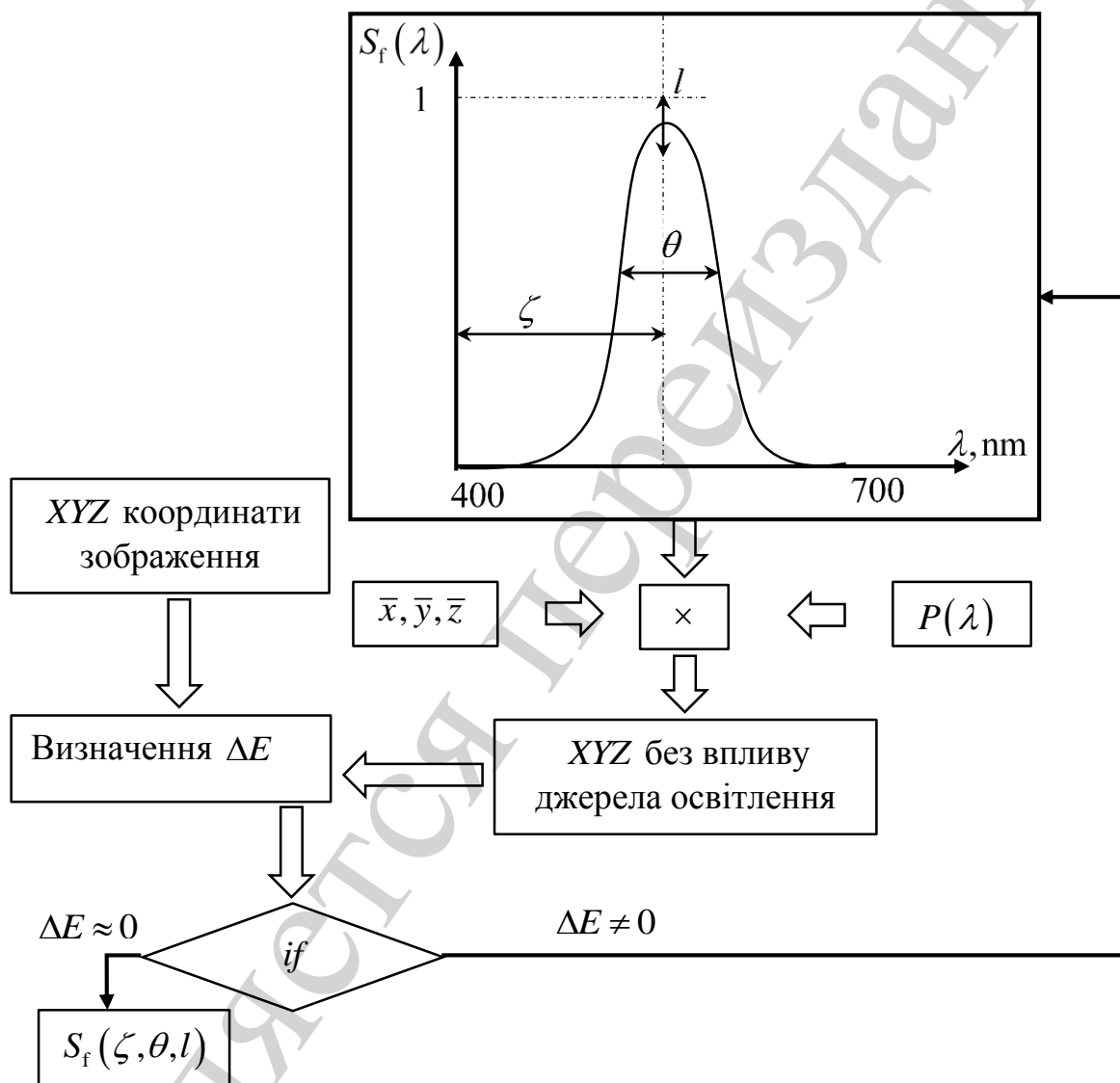


Рис. 3. Алгоритм визначення спектрального розподілу за заданими координатами кольоровості

На рис. 3 \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} – характеристики чутливості камери, $P(\lambda)$ – спектральний розподіл джерела освітлення. Представлена схема алгоритму дозволяє визначити величину впливу джерела освітлення на кольоропередачу. Використовуючи (1), отримуємо XYZ_e , що є координатами кольоровості, що відображають вплив джерела освітлення. ΔE – вектор в просторі системи координат рівноконтрастної системи координат *CAM16-UCS* [10, 18], що

враховує характеристики кольоросприйняття людського зорового апарату й розраховується за формулою (3),

$$\Delta E = \sqrt{(J' - J'_e)^2 + (a'_M - a'_{Me})^2 + (b'_M - b'_{Me})^2}. \quad (3)$$

Щодо визначення характеристики спектрального розподілу $S_f(\lambda)$ (4), то її отримують шляхом пошуку нижнього екстремуму функціональної залежності. В залежності (4) змінними є центр спектрального розподілу λ , ширина характеристики фільтру θ , де $\theta = \lambda_{i+1} - \lambda_i$, а $i \in (400, 700)$ та рівень l , що може бути представлено формулою (4).

$$S_f(\lambda, \theta, l) = l \cdot f(\lambda, \theta), \quad (4)$$

де $f(\lambda, \theta)$ є функціональна залежність, що відображає реакцію фільтру на імпульсну характеристику.

Виходячи з аналізу попередніх напрацювань [5, 8, 19], за основу було обрано залежність, що описується інтерпретованою у використуваних у даній роботі величинах функціональною залежністю $L(\lambda)$ (5),

$$L(\lambda) = e^{-\frac{(\lambda - 2\theta)^2}{n\theta^2}}. \quad (5)$$

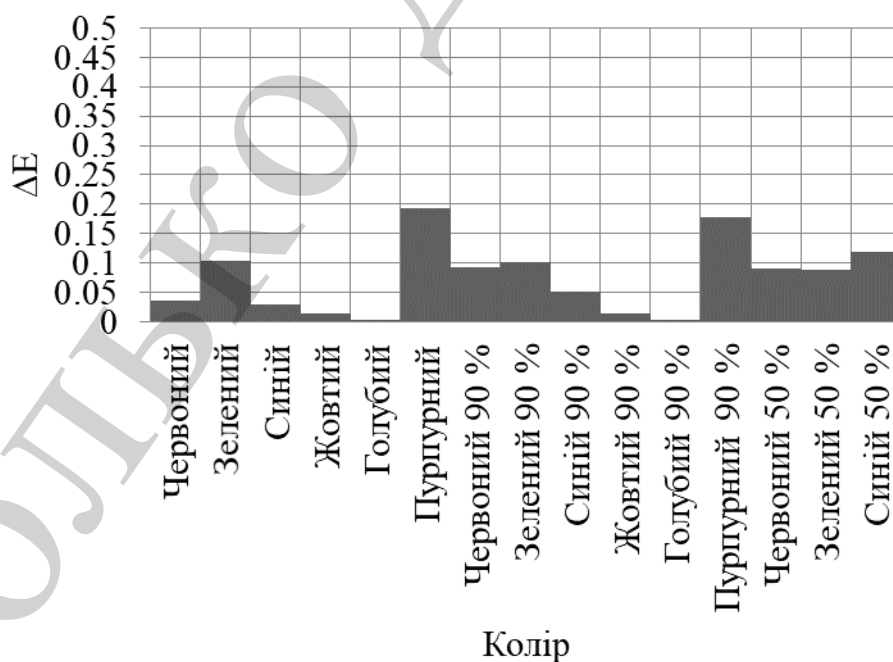


Рис. 4. Значення помилки ΔE для обраного випробувального кольору

З рис. 4 можна помітити, що розрахована помилка кольоропередачі ΔE (3) при моделюванні з використанням виразу (5) за критеріями оцінювання кольоропередавання, представленими в [16, 17], може класифікуватись, як «не помітні». Представлені результати доводять можливість використання даної функціональної залежності для моделювання спектрального розподілу кольору об'єкту сцени.

Так, для обраного спектрального розподілу на основі функції Гауса було отримано дані табл. 2, де представлено центр спектрального розподілу λ функції із значеною довжиною хвилі та ширина спектрального розподілу $\Delta\lambda$ у відліках nm . В табл. 2 представлено значення ΔE , що вказує на мінімальне відхилення від вхідних координат. Для пурпурного кольору M відсутні дані, так як даний колір утворюється адитивним способом за участі червоного R та синього B кольорів у відповідному співвідношенні, тому визначеної довжини хвилі даний колір не має, а відповідно й ширини характеристики.

Таблиця 2

Дані отримані з використанням фільтру, що описується розподілом Гауса

	R	G	B	Ye	C	M	$R_{0.9}$	$G_{0.9}$	$B_{0.9}$	$Ye_{0.9}$	$C_{0.9}$	$M_{0.9}$	$R_{0.5}$	$G_{0.5}$	$B_{0.5}$
λ , нм	610	554	468	571	495	–	609	570	476	571	494	–	587	564	487
$\Delta\lambda$	19	48	31	98	101	–	20	103	23	109	107	–	160	122	65
ΔE	0.036	0.108	0.024	0.010	0.007	–	0.012	0.022	0.01	0.014	0.041	–	0.091	0.088	0.120

Для прикладу було проведено моделювання з використанням спектральних розподілів стандартизованих спектральних розподілів кольорів згідно стандарту МКО [6]. Для моделювання було обрано джерела освітлення типу D65, A (відносять до ламп розжарювання), F1 та F315 (приклади флуорисцентних джерел освітлення). Дані моделювання представлено в табл. 3–5.

В табл. 3–5 присутнє маркування, де зеленій колір відповідає по шкалі помітності кольорових змін відмітці – «не помітно», жовтий – «помітно але прийнятно» та червоний – «не прийнятно».

Містяться наступні величини x_e , y_e – координати тестового кольору в системі координат xyz , x_{out} , y_{out} – значення координат при освітленні обраним джерелом освітлення, a'_{M_e} , b'_{M_e} – координати тестового кольору в системі координат рівноконтрасної системи CAM16 (a'_M, b'_M) , що дозволяє спрогнозувати властивості кольоросприйняття спостерігачем, $a'_{M_{out}}$, $b'_{M_{out}}$ – значення координат при освітленні обраним джерелом освітлення.

Таблиця 3

Результати моделювання з використанням джерела освітлення типу D65

Основні та додаткові до основних кольори з насиченістю 100 % та зі спектральним розподілом представленим на рис. 5						
	R	G	B	Ye	C	M
x_e	0.65	0.4	0.13	0.4	0.24	0.2
y_e	0.34	0.5	0.07	0.5	0.3	0.3
x_{out}	0.65	0.37	0.13	0.4	0.23	0.2
y_{out}	0.34	0.56	0.07	0.5	0.3	0.3
a'_{M_e}	54.6	-27.1	-11.1	-11.6	-31.6	-32.5
b'_{M_e}	38.8	39.7	-63.7	39.7	-8.4	-14.8
$a'_{M_{out}}$	54.6	-29.7	-10.7	-15.5	-33.5	-34.05
$b'_{M_{out}}$	38.8	38.5	-63.9	38.6	-10.8	-16.7
ΔE	0.03	2.9	0.5	4.13	3.08	2.4
Основні та додаткові до основних кольори з насиченістю 90 % та зі спектральним розподілом представленим на рис. 6						
	$R_{0.9}$	$G_{0.9}$	$B_{0.9}$	$Ye_{0.9}$	$C_{0.9}$	$M_{0.9}$
x_e	0.6	0.4	0.12	0.4	0.25	0.2
y_e	0.3	0.5	0.1	0.48	0.3	0.3
x_{out}	0.6	0.37	0.12	0.4	0.2	0.2
y_{out}	0.3	0.5	0.1	0.5	0.3	0.3
a'_{M_e}	46.5	-23.2	-24.6	-10.4	-29.4	-30.1
b'_{M_e}	41.2	38.2	-56.06	36.9	-7.7	-12.7
$a'_{M_{out}}$	46.5	-26.3	-23.9	-14.6	-31.7	-32.06
$b'_{M_{out}}$	41.2	36.8	-56.5	35.5	-10.2	-14.8
ΔE	0.005	3.4	0.8	4.47	3.4	2.8
Основні кольори з насиченістю 50 % та зі спектральним розподілом представленим на рис. 7						
	$R_{0.5}$	$G_{0.5}$	$B_{0.5}$			
x_e	0.38	0.38	0.14			
y_e	0.4	0.4	0.27			
x_{out}	0.36	0.36	0.14			
y_{out}	0.4	0.4	0.26			
a'_{M_e}	0.47	-8.7	-43.6			
b'_{M_e}	21.6	26.2	-23.09			
$a'_{M_{out}}$	-5.4	-13.9	-43.4			
$b'_{M_{out}}$	19.8	24.2	-24.4			
ΔE	6.19	5.6	1.36			

Таблиця 4

Результати моделювання з використанням джерела освітлення типу А

Основні та додаткові до основних кольори з насиченістю 100 % та зі спектральним розподілом представленим на рис. 1						
	R	G	B	Ye	C	M
x_{out}	0.65	0.4	0.12	0.48	0.3	0.3
y_{out}	0.3	0.5	0.08	0.48	0.4	0.4
a'_{M_e}	54.6	-27.1	-11.1	-11.6	-31.6	-32.5
b'_{M_e}	38.8	39.7	-63.7	39.7	-8.4	-14.8
$a'_{M_{out}}$	54.9	-18.7	-18.6	-0.7	-25.3	-30.1
$b'_{M_{out}}$	38.7	43.9	-60.6	43.9	20.2	15.2
ΔE	0.25	9.4	8.16	11.6	29.27	30.2
Основні та додаткові до основних кольори з насиченістю 90 % та зі спектральним розподілом представленим на рис. 2						
	$R_{0.9}$	$G_{0.9}$	$B_{0.9}$	$Ye_{0.9}$	$C_{0.9}$	$M_{0.9}$
x_{out}	0.6	0.4	0.1	0.48	0.3	0.3
y_{out}	0.36	0.5	0.13	0.47	0.4	0.4
a'_{M_e}	46.5	-23.2	-24.6	-10.4	-29.4	-30.1
b'_{M_e}	41.2	38.2	-56.06	36.9	-7.7	-12.7
$a'_{M_{out}}$	46.8	-13.7	-34.4	0.7	-21.8	-25.2
$b'_{M_{out}}$	41.1	43.3	-49.1	42.4	21.5	18.2
ΔE	0.25	10.8	12.07	12.4	30.2	31.4
Основні кольори з насиченістю 50 % та зі спектральним розподілом представленим на рис. 3						
	$R_{0.5}$	$G_{0.5}$	$B_{0.5}$			
x_{out}	0.47	0.46	0.17			
y_{out}	0.4	0.45	0.39			
a'_{M_e}	0.4	-8.7	-43.6			
b'_{M_e}	21.6	26.2	-23.09			
$a'_{M_{out}}$	10.8	2.6	-49.3			
$b'_{M_{out}}$	34.6	36.9	-2.18			
ΔE	16.6	15.7	21.7			

Таблиця 5

Результати моделювання з використанням джерела освітлення типу F1

Основні та додаткові до основних кольори з насиченістю 100 % та зі спектральним розподілом представленим на рис. 1						
	R	G	B	Ye	C	M
x_{out}	0.6	0.3	0.1	0.4	0.2	0.2
y_{out}	0.3	0.5	0.07	0.5	0.3	0.3
a'_{M_e}	54.6	-27.1	-11.1	-11.5	-31.5	-32.5
b'_{M_e}	38.8	39.7	-63.7	39.7	-8.4	-14.8
$a'_{M_{out}}$	54.6	-27.1	-11.1	-11.5	-31.5	-32.5
$b'_{M_{out}}$	38.8	39.7	-63.7	39.7	-8.4	-14.8
ΔE	0	0	0	0	0	0
Основні та додаткові до основних кольори з насиченістю 90 % та зі спектральним розподілом представленим на рис. 2						
	$R_{0.9}$	$G_{0.9}$	$B_{0.9}$	$Ye_{0.9}$	$C_{0.9}$	$M_{0.9}$
x_{out}	0.6	0.39	0.12	0.4	0.24	0.2
y_{out}	0.3	0.5	0.1	0.48	0.3	0.3
a'_{M_e}	46.5	-23.2	-24.6	-10.4	-29.4	-30.1
b'_{M_e}	41.1	38.19	-56.06	36.9	-7.7	-12.7
$a'_{M_{out}}$	46.5	-23.2	-24.6	-10.4	-29.4	-30.1
$b'_{M_{out}}$	41.1	38.19	-56.06	36.9	-7.7	-12.7
ΔE	0	0	0	0	0	0
Основні кольори з насиченістю 50 % та зі спектральним розподілом представленим на рис. 3						
	$R_{0.5}$	$G_{0.5}$	$B_{0.5}$			
x_{out}	0.38	0.38	0.15			
y_{out}	0.4	0.4	0.27			
a'_{M_e}	0.47	-8.7	-43.6			
b'_{M_e}	21.6	26.2	-23.09			
$a'_{M_{out}}$	0.4	-8.7	-43.6			
$b'_{M_{out}}$	21.6	26.2	-23.09			
ΔE	0	0	0			

На рис. 4–7 представлено спектральні розподіли, що еквівалентні координатам кольору табл. 1.

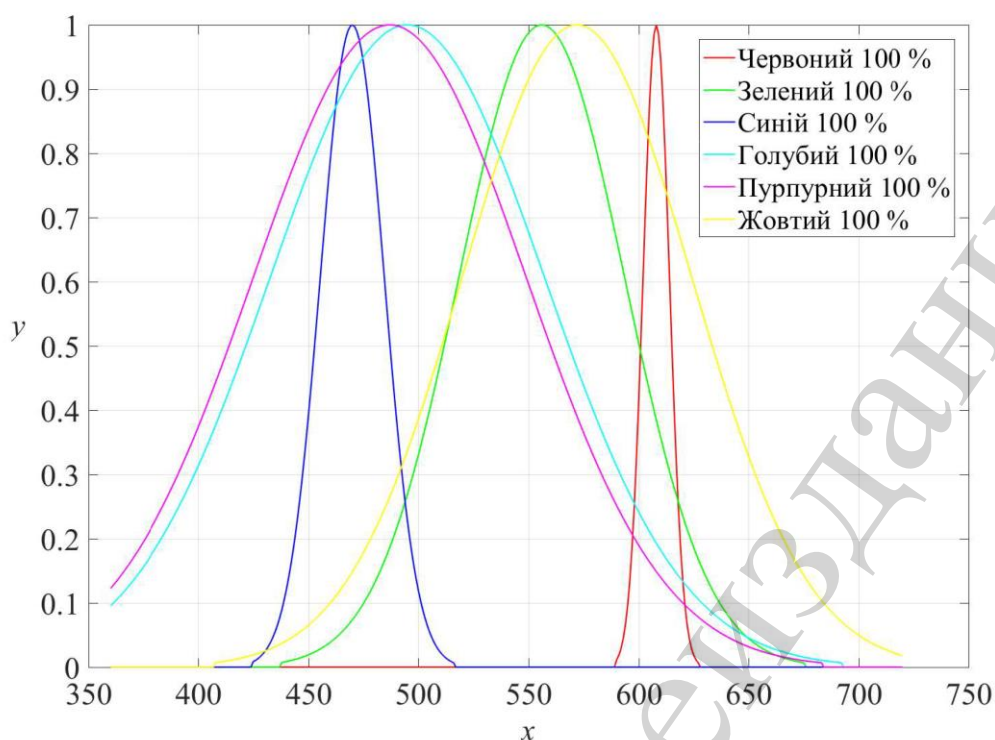


Рис. 5. Нормований спектральний розподіл для основних та додаткових кольорів 100 % насиченості телебачення високої чіткості. Характеристики побудовані на основі розподілу Гауса

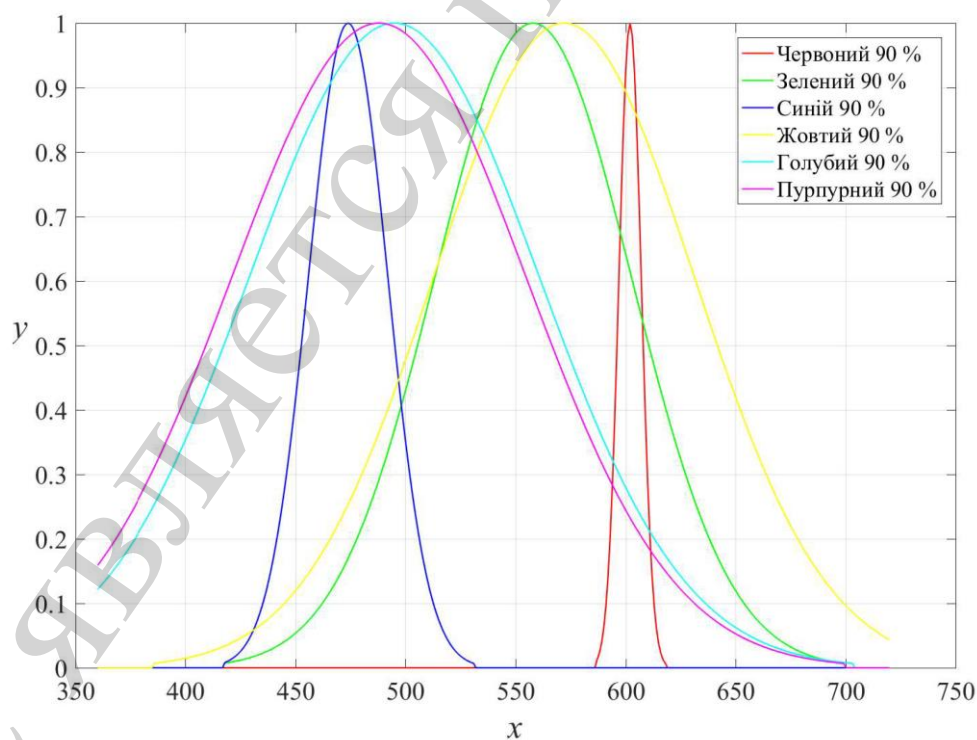


Рис. 6. Нормований спектральний розподіл для основних та додаткових кольорів 90 % насиченості телебачення високої чіткості. Характеристики побудовані на основі розподілу Гауса

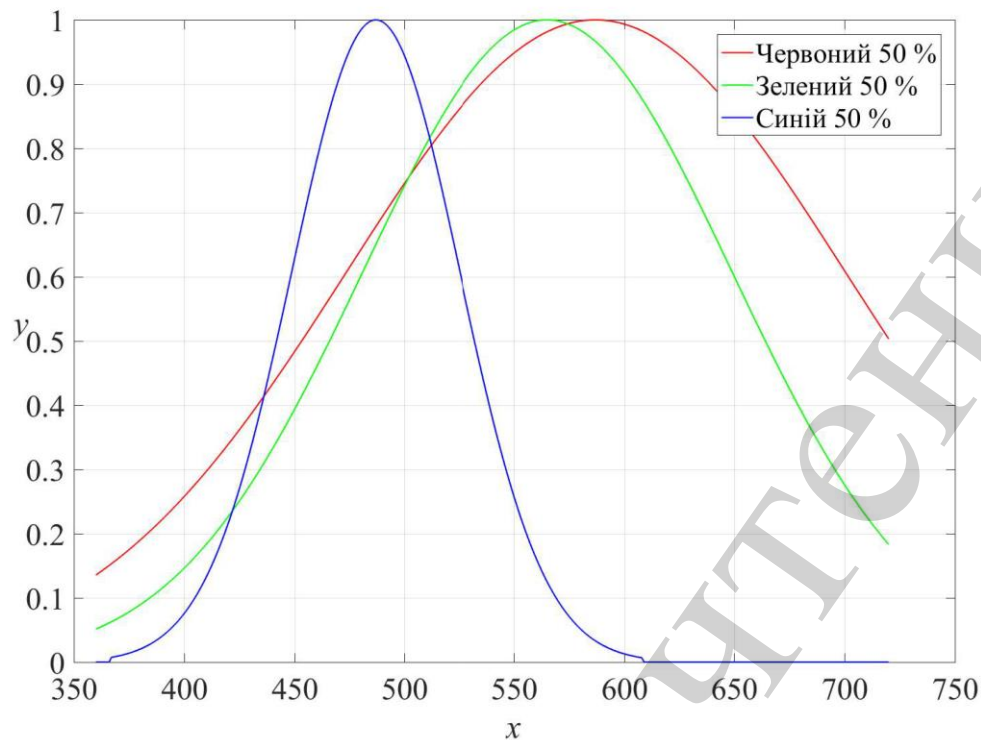


Рис. 7. Нормований спектральний розподіл для основних та додаткових кольорів 50 % насиченості телебачення високої чіткості. Характеристики побудовані на основі розподілу Гауса

Слід розрізняти похибки, представлені в табл. 2, де йде мова про моделювання спектру з використанням еталонного денного світла та похибки, представлені в табл. 3–5. На спектральний розподіл еталонного кольору діє джерело освітлення з відмінним спектром від денного.

4. 3. Оцінювання кольоропередавання на базі реальних спектральних розподілів кольорів

Пошук необхідного кольору здійснюється з множини спектральних розподілів кольорів згідно [20, 21]. Визначення шуканого спектрального розподілу здійснюється визначенням параметру ΔE (1), а критерій відповідності визначається згідно (7), де величина ΔE повинна прямувати до нуля.

$$\Delta E(i) \approx 0, i \in (1, N). \quad (7)$$

Шукані спектральні розподіли представлено в табл. 6.

У табл. 6 кольоровими маркерами позначені пари, що задовольняють двом тестовим кольорам, але з різною похибкою. Це обумовлено тим, що у документах представлено недостатній набір спектральних розподілів, тому деякі з них було обрано для обох кольорів із-за відсутності інших спектрів. На практиці слід обрати колір для тестування кольору з найменшою похибкою.

Таблиця 6

Дані кольорів, що рекомендовано використовувати для оцінювання кольоропередавання (x , y – координати кольору згідно ITU-R BT.709, x_{spectral} , y_{spectral} – координати кольору, що еквівалентні знайденому спектру)

	Підбір кольору з набору спектрів згідно [20]				Підбір кольору з набору спектрів згідно [21]			
	x_{spectral}	y_{spectral}	id кольору	$\square E$	x_{spectral}	y_{spectral}	id кольору	$\square E$
R	0.638	0.330	of09_g	0.001	0.624	0.351	164	0.045
G	0.301	0.602	ph03_t	0.002	0.343	0.514	1492	0.160
B	0.157	0.060	ph02_t	0.007	0.199	0.136	2386	0.095
C	0.222	0.328	of02_d	0.001	0.210	0.286	3328	0.052
M	0.314	0.156	pr_ij_4	0.006	0.325	0.171	3321	0.022
Ye	0.419	0.505	pr_ij_3	0.000	0.398	0.483	1895	0.030
$R_{0.9}$	0.689	0.305	pr_ds_2	0.306	0.607	0.349	158	0.025
$G_{0.9}$	0.302	0.577	gr_p	0.002	0.343	0.514	1492	0.131
$B_{0.9}$	0.167	0.081	pr_sh_2	0.005	0.228	0.200	3099	0.024
$C_{0.9}$	0.232	0.328	of06_d	0.001	0.264	0.332	2832	0.054
$M_{0.9}$	0.322	0.170	of04_d	0.002	0.264	0.332	2832	0.044
$Ye_{0.9}$	0.406	0.488	pr_ds_1	0.002	0.398	0.483	1895	0.011
$R_{0.5}$	0.440	0.329	of08_d	0.000	0.413	0.331	3527	0.039
$G_{0.5}$	0.304	0.474	pr_ds_4	0.002	0.336	0.478	3436	0.041
$B_{0.5}$	0.224	0.182	pr_sh_2	0.001	0.228	0.200	3099	0.023

Представлені в таблиці 6 результати можуть слугувати для побудови оптичного метрологічного забезпечення для оцінювання якості функціонування тракту передавання відеоінформації.

4. 4. Нові кроки в метрологічному забезпеченні мультимедійних та медійних трактах

Використання загальноприйнятого чи розширеного набору випробувальних кольорів, що представлено вище, має ряд обмежень, а саме:

- для першого (табл. 1, 6) відсутній спектральний розподіл пропонованих наборів кольорів;
- обмеженість використання набору випробувальних кольорів із-за малої кількості кольорів;
- неможливість використання в повній мірі набір із-за технічних обмежень системи, що передає відео.

Як показано в роботі [16], зі збільшенням яскравості зображення область кольорів, що передаються, змінюється у вигляді зрізання синьої, червоної та зеленої частини трикутника кольоровості. В обмеженій області кольоропередавання пропоновані тестові точки кольоровості табл. 2, 6, а відповідно й

процес прогнозування впливу джерела освітлення, не може представлятись ефективним. Розглянемо більш детально зазначені обмеження та можливі шляхи вирішення.

Пропонований алгоритм адаптації до освітлення повинен реалізовуватись з використанням метрологічного забезпечення, в значно ширшому розумінні, чим прийнято на даний момент часу. Доцільним є врахування обмеженості області кольорів, що передаються із-за зміни яскравості зображення, та фізіологічних властивостей процесу кольоросприйняття.

Представлені набори кольорів [17], що використано для оцінювання в [16], не достатньо для прогнозування величини впливу на координати кольоровості джерела освітлення. Саме тому потрібно розширити метрологічне забезпечення. Наприклад атлас кольорів, що його запропоновано в роботі [22], де авторами пропонуються лише координати кольоровості. Для повноцінного використання пропонованих атласів кольорів пропонується використати алгоритм пошуку, представлений на рис. 2, 3, що дозволить визначати спектральний розподіл атласу кольорів та визначити вплив спектрального розподілу джерела освітлення.

Величина та характер спотворень представлено на табл. 7 та рис. 8, де \bullet – позначено еталонні точки, а $+$ – зміщення точок під впливом джерела освітлення типу A, D65, F1 та F315.

Таблиця 7

Значення максимальної величини впливу джерела освітлення на колір, що виражена в одиницях ΔE

Тип джерела освітлення	Згідно координат кольоровості простору xyz	Згідно координат кольоровості простору CAM16
F315	0.025	10.00
F1	0.025	12.01
D65	0.031	14.18
A	0.177	19.02

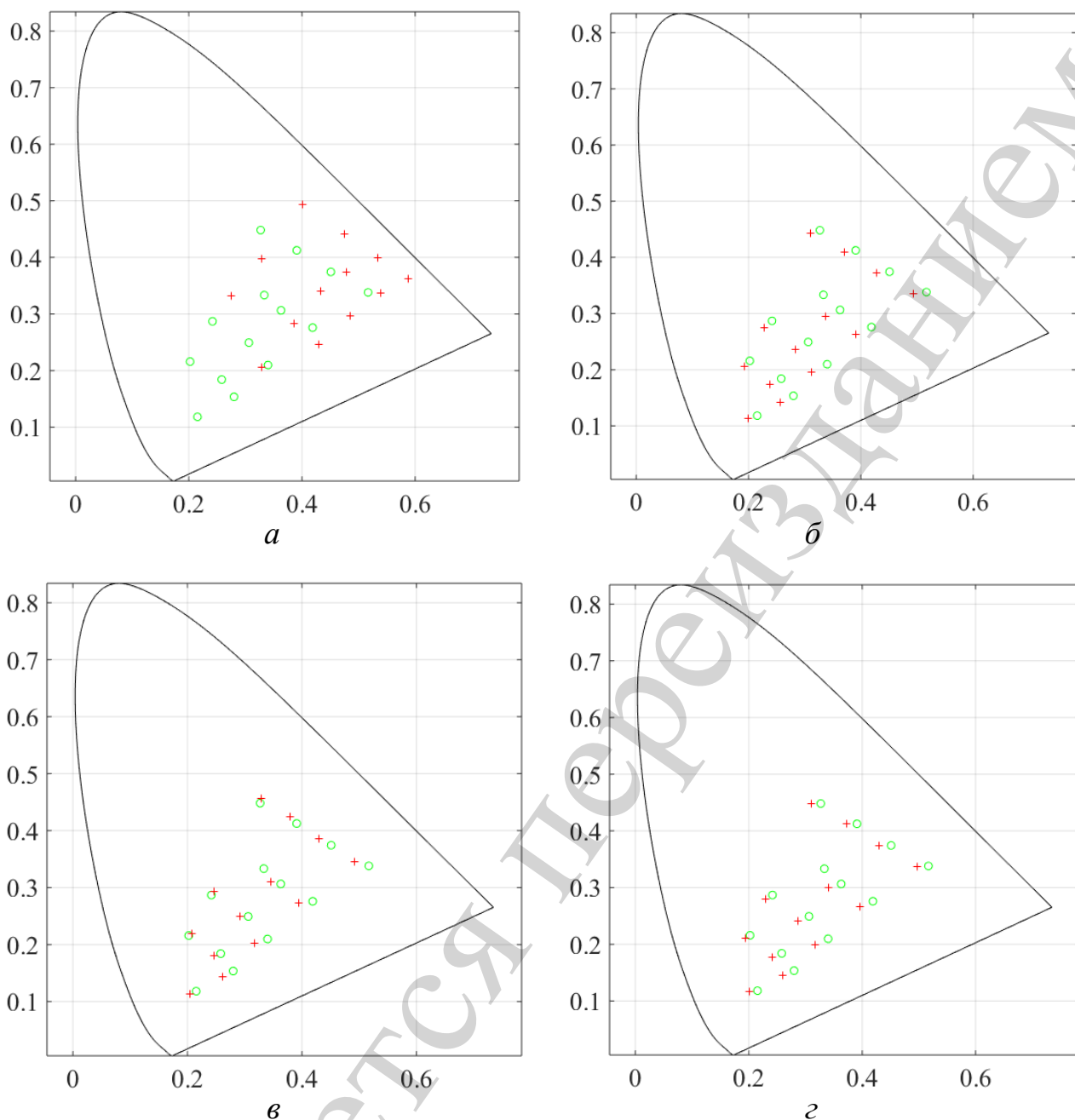


Рис. 8. Величина та характер впливу джерела освітлення на координати кольоровості: *а* – вплив джерела освітлення типу А; *б* – вплив джерела освітлення типу D65; *в* – вплив джерела освітлення типу F1; *г* – вплив джерела освітлення типу F315

З отриманих даних слідує:

- врахування впливу джерела освітлення є актуальним, так як це може спричинити недопустимі зміни кольорових координат, а відповідно і кольору;
- різні джерела освітлення впливають по різному на кожну з обраних точок набору кольорів, рис. 8;
- врахування похибки в координатах хуз свідчить про допустимі зміни координат кольоровості, а в рівноконтрастній системі кольоросприйняття CAM16 – про недопустимі. Отже для підвищення якості передаваного відеоматеріалу потрібно враховувати властивості кольоросприйняття.

5. Результати досліджень алгоритму адаптації до джерела освітлення та властивостей кольоросприйняття

За вхідні дані було обрано зображення, що має в своєму складі широку гаму кольорів та може використовуватись для дослідження кольорів. Моделювання було проведено при використанні джерел освітлення типу D65, F135, F1, A. Структурна схема процесу моделювання представлена на рис. 9



Рис. 9. Структурна схема процесу моделювання

Зображення з камери представлено на рис. 10, де матриця $n \times t$ складається з множини корегуючих значень $\square E$, в якій n – кількість елементів зображення по горизонталі, а t – по вертикалі. Знаючи величину та характер впливу джерела освітлення можна врахувати значення $\square E$, результати представлені на рис. 11.

На рис. 10 показано передаване зображення сцени, що освітлена різними джерелами освітлення, та відновлене зображення, рис. 11. Помітно, як саме змінюється кольоровий тон та насиченість кольорів рис. 10 у порівнянні з еталонним рис. 11.

Використовуючи алгоритм, представлений на рис. 1–3, було досягнуто результат по відновленню зображення за заданим спектральним розподілом джерела освітлення. Відновлене зображення представлено на рис. 11.



Рис. 10. Тестові зображення, що є освітлено джерелами освітлення різного типу: *а* – джерело освітлення типу А, *б* – джерело освітлення типу D65, *в* – джерело освітлення типу F315, *г* – джерело освітлення типу F1



Рис. 11. Відновлене зображення

Згідно проведених досліджень представлено результати об'єктивних оцінок табл. 3–5 та суб'єктивних рис. 10, 11 впливу джерела освітлення

На рис. 12 та 13 зображено комплексний вплив джерела освітлення та властивостей кольоросприйняття людини. Враховуючи властивості кольоросприйняття, з'являється можливість розширити діапазон роботи алгоритму по яскравості. Зазначене розширення дозволяє отримати зображення рис. 11 незалежно від інтенсивності освітлення (темного рис. 12, тьмяного, середнього рис. 13).

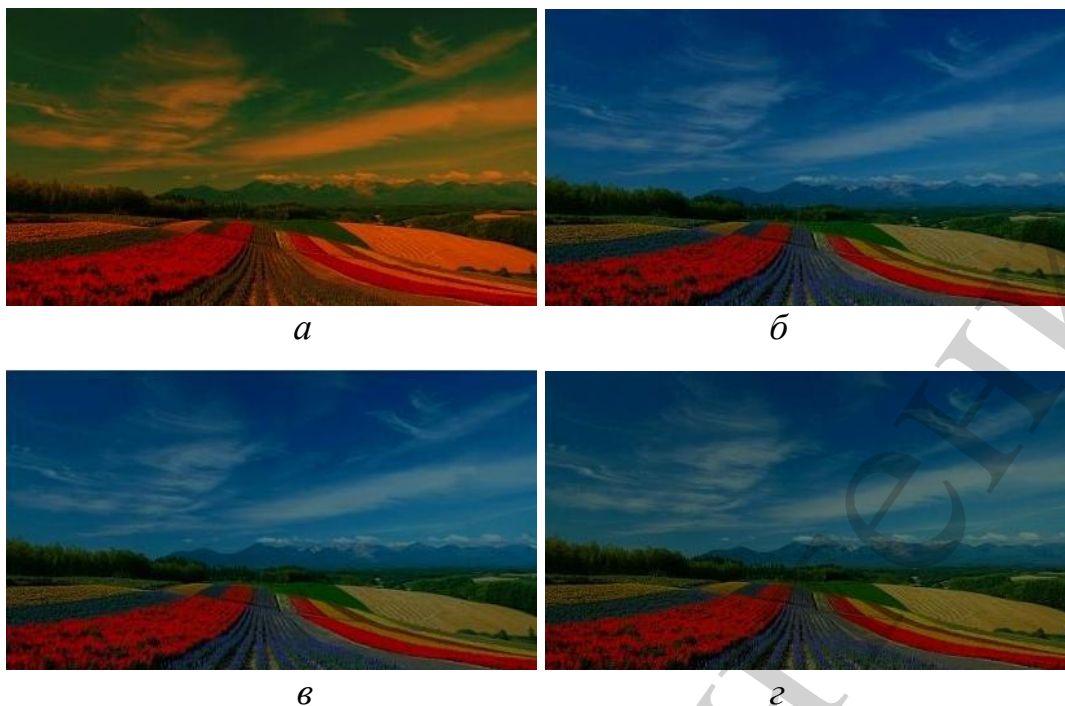


Рис. 12. Тестові зображення з умовами зйомки на передавальній стороні $L_A=200$ кд/м² та умовами спостереження – середні, та умовами спостереження $L_A=20$ кд/м² та умовами спостереження – тусклі, що є освітлено джерелами освітлення різного типу: *a* – джерело освітлення типу А, *б* – джерело освітлення типу D65, *в* – джерело освітлення типу F315, *г* – джерело освітлення типу F1

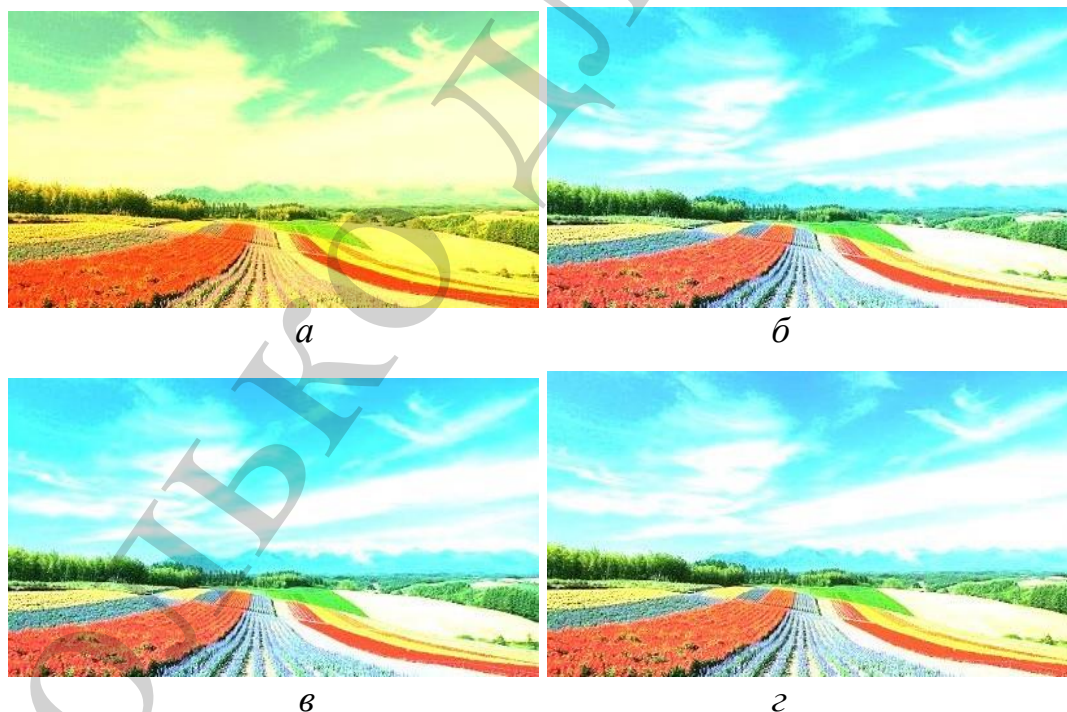


Рис. 13. Тестові зображення з умовами зйомки на передавальній стороні $L_A=20$ кд/м² та умовами спостереження – тусклі, та умовами спостереження $L_A=200$ кд/м² та умовами спостереження – середні, що є освітлено джерелами освітлення різного типу: *a* – джерело освітлення типу А, *б* – джерело освітлення типу D65, *в* – джерело освітлення типу F315, *г* – джерело освітлення типу F1

Таким чином, в роботі визначено межі, в яких пропонований алгоритм відновлює зображення після впливу джерела освітлення й враховує разом з тим властивості кольоросприйняття.

6. Обговорення результатів дослідження пропонованого алгоритму адаптації

Представлені дослідження стосуються адаптації кольору до джерела освітлення та можливості передавання його каналом зв'язку за умови врахування властивостей кольоросприйняття на передавальній та приймальній сторонах.

Пропонований алгоритм дозволяє визначити величину впливу джерела освітлення в точці спостереження без використання оптичних еталонів. Моделювання здійснюється з використанням пропонованого набору кольорів, що рівномірно заповнює область передаваних кольорів. Використовувані кольори представлені в координатах кольоровості, тому в роботі пропонується аналітичний метод визначення спектрального розподілу обраного кольору. Пропонується структурна схема алгоритму безперервної адаптації до джерела освітлення із використанням алгоритму, представленого на рис. 2. Слід зауважити, що на даний час здійснюється адаптація лише по яскравості, а пропоновані методи стосуються кольорової адаптації на рівні спектрального розподілу.

Серед переваг пропонованого методу слід відзначити адаптацію безпосередньо на місці зйомки чи відтворення, без використання оптичних еталонів для калібрування системи, що дозволило забезпечити процес неспотвореного передавання відео. Величину впливу джерела освітлення на колір в розумінні властивостей кольоросприйняття, що система може виправити, представлено в табл. 3–5.

Проведено аналіз існуючих методів контролю та забезпечення неспотвореної кольоропередачі, табл. 6, та доведено, що даного набору кольорів недостатньо при роботі системи в широкому діапазоні яскравості об'єкту зображення. Тому було запропоновано атлас кольорів, що рівномірно заповнює область передаваних кольорів системою та розширює можливості налагодження відеосистеми з студійних умов до будь-яких.

Використання моделі кольоросприйняття для прогнозування та врахування зміни зображення при передаванні чи відтворенні дозволило забезпечити відтворення зображення таким, яким його повинен бачити глядач. Дана обставина забезпечить не лише комфортне спостереження передаваного відеоконтенту, але в спеціалізованих застосуваннях, де параметри кольору є критичними може бути невід'ємною.

Слід зазначити про обмеження, що існують при функціонуванні алгоритму, – це параметри системи та неможливість передавання всієї діаграми кольоровості на різних рівнях яскравості. Також до можливих видів обмеження слід віднести наявність пристрою для визначення спектрального розподілу джерела освітлення на передавальній та на приймальній стороні. Це може бути вирішено шляхом встановлення додаткового датчику на існуючі системи чи вбудованого на нові, що лише створюються.

Використання моделі кольоросприйняття орієнтовано на стандартного глядача, що може бути як обмеження, тому продовжити дослідження з розширенням спроможності моделі на універсального глядача є пріоритетною задачею.

При розвитку нових систем передавання відео, використання в сферах застосування таких як медицина, головним є якість передавання кольору, але забезпечення якості передавання кольору викликане появою несуттєвих недоліків. До них слід віднести збільшення розрахункової спроможності передавального та приймального обладнання по відношенню до існуючого.

В подальшому пропонується продовжити дослідження, що стосуються спектральної адаптації зображення на реальних зображеннях та сценах, з використанням більшого набору спектральних розподілів джерела освітлення.

7. Висновки

1. За результатами моделювання спектрального розподілу кольору передаваного зображення по заданим координатам отримано дані, що мають похибку до 0,2 одиниць МКО рис. 4, що кваліфікується, як не помітні спотворення. На основі отриманих спектральних розподілів було проведено моделювання виключення впливу різних джерел освітлення, що вносять недопустимі помилки по відношенню до оригіналу рис. 10, 11. Таким чином розроблений алгоритм може бути використано при виключенні впливу різних джерел освітлення.

2. Доведено, що врахування моделі кольоросприйняття є необхідним, так як при використанні традиційної системи координат величина максимальної похибки при різних джерелах знаходиться в межах 0,025–0,177 одиниць МКО. Максимальні значення величини впливу в координатах моделі кольоросприйняття знаходяться в межах 10–19,02 одиниць МКО. Це свідчить про те, що в першому випадку можна сказати, що колір не спотворений, так як величина похибки мінімальна, але насправді з точки зору спостерігача спотворення приймають недопустимі значення (більше 4–8 одиниць МКО). Таким чином здійснюється адаптація не залежно від умов зйомки і до властивостей кольоросприйняття.

3. Із-за збільшення яскравості стимулу зображення область передаваних кольорів зменшується але на роботу алгоритму обмеження не впливають. Застосовувати алгоритм для адаптації в області кольорів, що не передається системою із-за обмежень, є не доцільним з точки зору оптимізації роботи сукупної системи.

4. В якості метрологічного інструменту запропоновано використання набору координат атласу кольорів та алгоритм визначення спектрального розподілу за заданими координатами кольоровості. Одним з метрологічних інструментів може бути запропонований набір із спектрів універсальних випробувальних кольорів. Похибка метрологічного інструменту не перевищує 0,2 одиниць МКО, що на результуючому зображенні кваліфікується за шкалою кольорових спотворень, як «не помітно».

Подяки

Роботу виконано в рамках науково-дослідної роботи на замовлення Міністерства освіти і науки України, реєстраційний номер 0117U006808

Література

1. Recommendation ITU-R BT.709-6. Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange. Geneva, 2015. 19 p.
2. Recommendation ITU-R BT.2020-2. Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange. Geneva, 2015. 8 p.
3. Recommendation ITU-R BT.2100. Image parameter values for high dynamic range television for use in production and international programme exchange. Geneva, 2018. 16 p.
4. ITU-R Television colorimetry elements. Geneva, 2017. P. 78.
5. CIE Technical Report: Colorimetry. Geneva, 2004. P. 19.
6. Pyliavskiy V. An evaluations of color reproduction distortion in high definition television path with use of color bar signals // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika*. 2014. Issue 3. P. 26–32.
7. Phuangsuan C., Ikeda M. Chromatic adaptation to illumination investigated with adapting and adapted color // *Color Research & Application*. 2017. Vol. 42, Issue 5. P. 571–579. doi: <https://doi.org/10.1002/col.22117>
8. Adaptation to observation conditions in television systems by means of signal correction / Gofaizen O., Pyliavskiy V., Osharovska O., Patlayenko M. // 2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T). 2017. doi: <https://doi.org/10.1109/infocommst.2017.8246413>
9. Use color appearance model for video applications / Pyliavskiy V., Gofaizen O., Siden S., Vakarchuk A. // 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/tcset.2018.8336419>
10. Comprehensive color solutions: CAM16, CAT16, and CAM16-UCS / Li C., Li Z., Wang Z., Xu Y., Luo M. R., Cui G. et. al. // *Color Research & Application*. 2017. Vol. 42, Issue 6. P. 703–718. doi: <https://doi.org/10.1002/col.22131>
11. Comparing two-step and one-step chromatic adaptation transforms using the CAT16 model / Li C., Xu Y., Wang Z., Luo M. R., Cui G., Melgosa M. et. al. // *Color Research & Application*. 2018. Vol. 43, Issue 5. P. 633–642. doi: <https://doi.org/10.1002/col.22226>
12. Xu L., Zhao B., Luo M. R. Colour gamut mapping between small and large colour gamuts: Part I gamut compression // *Optics Express*. 2018. Vol. 26, Issue 9. P. 11481. doi: <https://doi.org/10.1364/oe.26.011481>
13. Xu L., Zhao B., Luo M. R. Color gamut mapping between small and large color gamuts: part II gamut extension // *Optics Express*. 2018. Vol. 26, Issue 13. P. 17335. doi: <https://doi.org/10.1364/oe.26.017335>
14. Evaluation of Gamut Mapping Algorithms in different Uniform Colour Spaces / Zhao B., Xu L., Luo M. R., Safdar M. // 2018 Colour and Visual

Computing Symposium (CVCS). 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/cvcs.2018.8496580>

15. Khanh T. Q., Bodrogi P., Vinh T. Q. Color Quality of Semiconductor and Conventional Light Sources. Wiley, 2017. 370 p. doi: <https://doi.org/10.1002/9783527803453>

16. Gofaizen O. V., Pilyavskii V. Digital television systems colour gamut // Digital Technologies. 2012. Issue 11. P. 47–70.

17. Bukov R. M. The quality of color television images // Radio and Communication. 1988.

18. Luo M. R., Cui G., Li C. Uniform colour spaces based on CIECAM02 colour appearance model // Color Research & Application. 2006. Vol. 31, Issue 4. P. 320–330. doi: <https://doi.org/10.1002/col.20227>

19. Pilyavskiy V. V. On the selection of test material for colorimetry assesment of a quality of ultra high definition TV video path // Modern problems of radio engineering and telecommunications. 2014.

20. ISO/TR 16066:2003. Graphic technology – Standard object colour spectra database for colour reproduction evaluation (SOCS). Geneva: ISO, 2003. 46 p.

21. Floral Reflectance Database. URL: <http://reflectance.co.uk/>

22. Gofaizen O. V., Pilyavskiy V. V. Construction of equidistant grid in uniform color space, uniformly filling color gamut transmitted and reproduced by television systems // Digital Technologies. 2013. Issue 14. P. 62–80.